

# 微处理机控制铣床刀具补偿进给

张庆文 任初农  
(清华大学)

## 摘 要

本文介绍了用微处理机实现数控机床刀具补偿的一个应用实例，叙述了用于刀具补偿的专用单板计算机的软件和硬件设计思想，介绍了以通用单板机为手段的简易开发方法。

用微处理机实现机床局部功能智能化，采用分级式微机网络完成对一台或多台机床的控制，是一种较好的控制方案。这样可以使多变的机床控制功能模块化和标准化，也可以避免在较高的控制精度与微计算机的处理速度之间可能出现的矛盾。本文以一台大型数控模具铣床的一个局部功能智能化问题——刀具补偿进给为例，介绍一个专用微型单板计算机的设计与开发过程。

## 一、刀具补偿进给的数学模型及其优化

### 1. 数学模型

所讨论的数控模具铣床的整体控制任务由一台主计算机完成。刀具补偿进给由一块

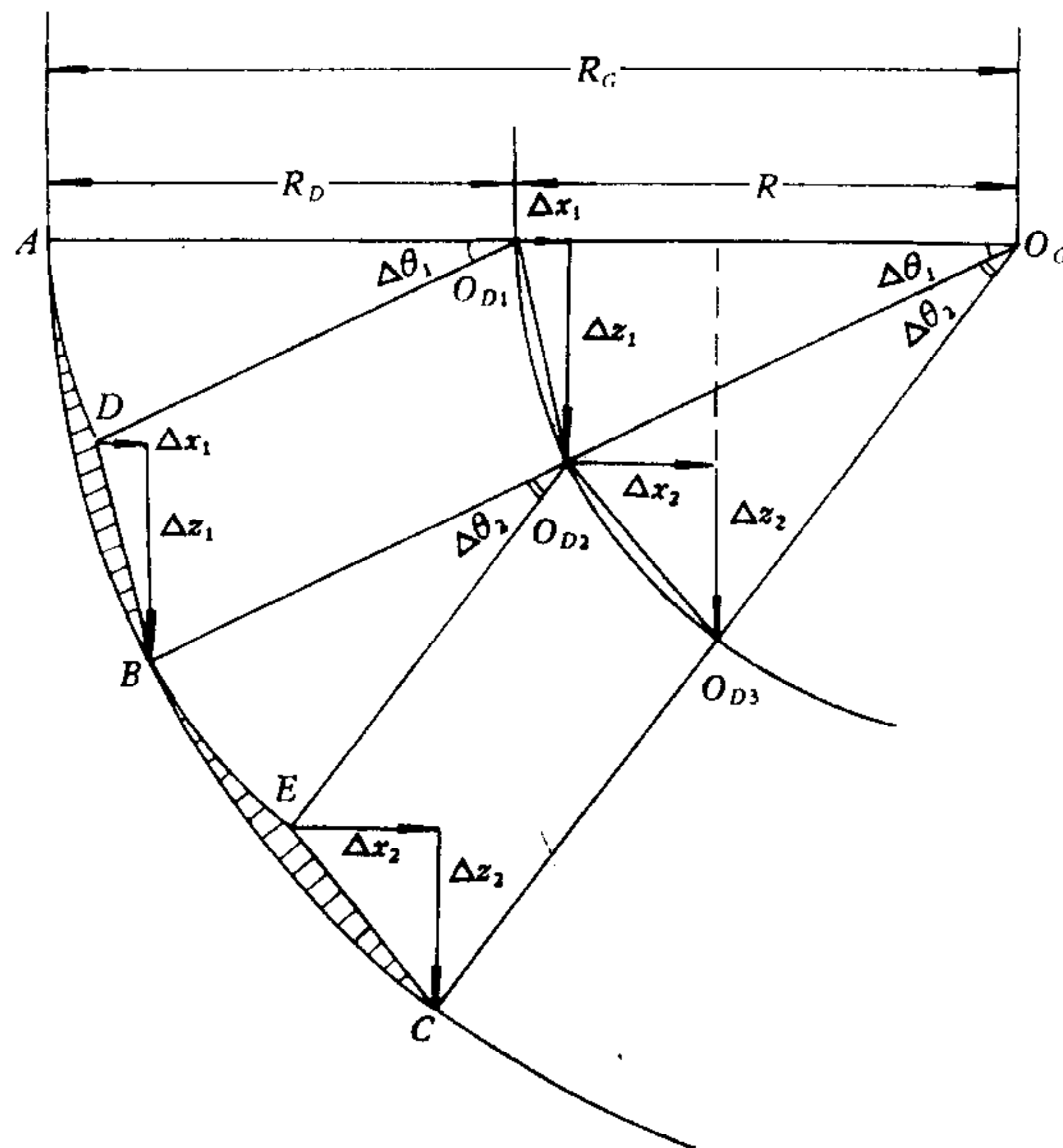


图1 刀具补偿进给原理

专用的微型单板计算机实施。补偿进给的原理如图 1 所示。

图中,  $R_G$  为待加工圆弧的半径;  $R_D$  为刀杆摆角运动半径;  $\Delta x$  为水平进给补偿运动;  $\Delta z$  为竖直进给补偿运动;  $O_G$  点为待加工圆弧的圆心;  $O_D$  点为刀杆摆角运动的圆心。铣刀的摆角运动由主控制机发出的  $\Delta\theta$  脉冲驱动, 其当量为一常数  $12''/\text{pulse}$ 。图中的  $\widehat{ABC}$  是理想的切削轨迹, 其半径为  $R_G$ , 圆心在  $O_G$  点。由于  $R_D < R_G$ , 使  $\Delta\theta$  驱动下的刀杆摆角运动路径是绕  $O_D$  点的小圆弧  $\widehat{AD}$ 。微处理机的任务就是根据主机发出的  $\Delta\theta_i$  脉冲, 参照刀具当前所在的位置, 计算出相应的补偿进给量  $\Delta x_i$  与  $\Delta z_i$  (其当量均为  $0.01 \text{ mm/pulse}$ ), 并在下一个驱动脉冲  $\Delta\theta_{i+1}$  到来之前把这些补偿进给脉冲 ( $\Delta x$  与  $\Delta z$ ) 发给相应的步进电机驱动器, 以使刀尖到达理想位置(如图 1 中的  $B$  点和  $C$  点)。

由图 1 可导出  $\Delta x$  与  $\Delta z$  的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta x_n = R \left( 1 - \cos \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i \right) - \sum_{i=0}^{n-1} \Delta x_i, \\ \Delta z_n = R \sin \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i - \sum_{i=0}^{n-1} \Delta z_i. \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\Delta\theta_i = 12''$ ,  $R = R_G - R_D$  (带符号数)。

## 2. 模型的优化

原始模型 (1) 式中含有多种不同运算, 以此为基础实现程序设计是很不理想的。根据 (1) 式右端体现的迭代关系可推得:

$$\begin{cases} \Delta x_n = R \left( \cos \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i - \cos \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i \right), \\ \Delta z_n = R \left( \sin \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i - \sin \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i \right). \end{cases} \quad (2)$$

再将 (2) 式中的三角函数和式降阶展开得

$$\begin{cases} \sin \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i \doteq \sin \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i \pm \cos \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i \cdot \sin 12'', \\ \cos \sum_{i=0}^n \Delta\theta_i \doteq \cos \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i \mp \sin \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i \cdot \sin 12''. \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式中的  $\pm$  号表征刀具摆角运动的不同方向。将 (3) 式代入 (2) 式, 得到优化模型 (4)

$$\begin{cases} \Delta x_n \doteq \pm R \cdot K \cdot \sin \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i, \\ \Delta z_n \doteq \pm R \cdot K \cdot \cos \sum_{i=0}^{n-1} \Delta\theta_i. \end{cases} \quad (4)$$

式中  $R = R_G - R_D$ ,  $K = \sin 12'' = \text{const.}$

## 二、程序设计中的几个问题

(1) 优化模型中仍包含三角函数求值计算。如果由通用子程序按台劳级数展开法求三角函数值, 则在刀具驱动过程中, 补偿精度与响应速度之间将出现不可调和的矛盾。在

刀具补偿控制领域中，大部分问题表现为点位式或轮廓式控制的进给量计算，函数的自变量通常是连续等距离变化的。据此，作者采用了快速递推算法。由三角函数和角公式推出相应的递推公式，把每次求三角函数值的运算建立在上次所得结果的基础之上，由  $\cos \Delta\theta \doteq 1$ ，又令  $\sin \Delta\theta = \sin 12'' = K$ ，有

$$\begin{cases} \sin(\theta \pm \Delta\theta) \doteq \sin\theta \pm K \cos\theta, \\ \cos(\theta \pm \Delta\theta) \doteq \cos\theta \mp K \sin\theta. \end{cases} \quad (5)$$

根据递推公式(5)，只需要做一次乘法运算和一次加(减)法运算就可以求得所需的三角函数值，并且在乘法中有一个因子  $K$  是已知常数，可以为它设计一个非常快速的专用乘法子程序。这样，快速递推算法求一次三角函数值大约只需时  $0.1 \text{ ms}$ ，与台劳级数展开法相比，速度至少提高一个数量级，满足了补偿计算的速度要求。

(2) 由于优化模型和递推算法中都做了近似处理，且 CPU 字长有限，所以在刀具摆角的整个  $\pm 45^\circ$  范围内做数万次递推计算将不可避免地产生较大的积累误差，这样得到的三角函数值将越来越不准确。为保证精度，作者采用如下算法：造一个稀疏的三角函数表预先置入只读存储器，然后在小区间内采用递推算法求三角函数值，每隔一定间隔停

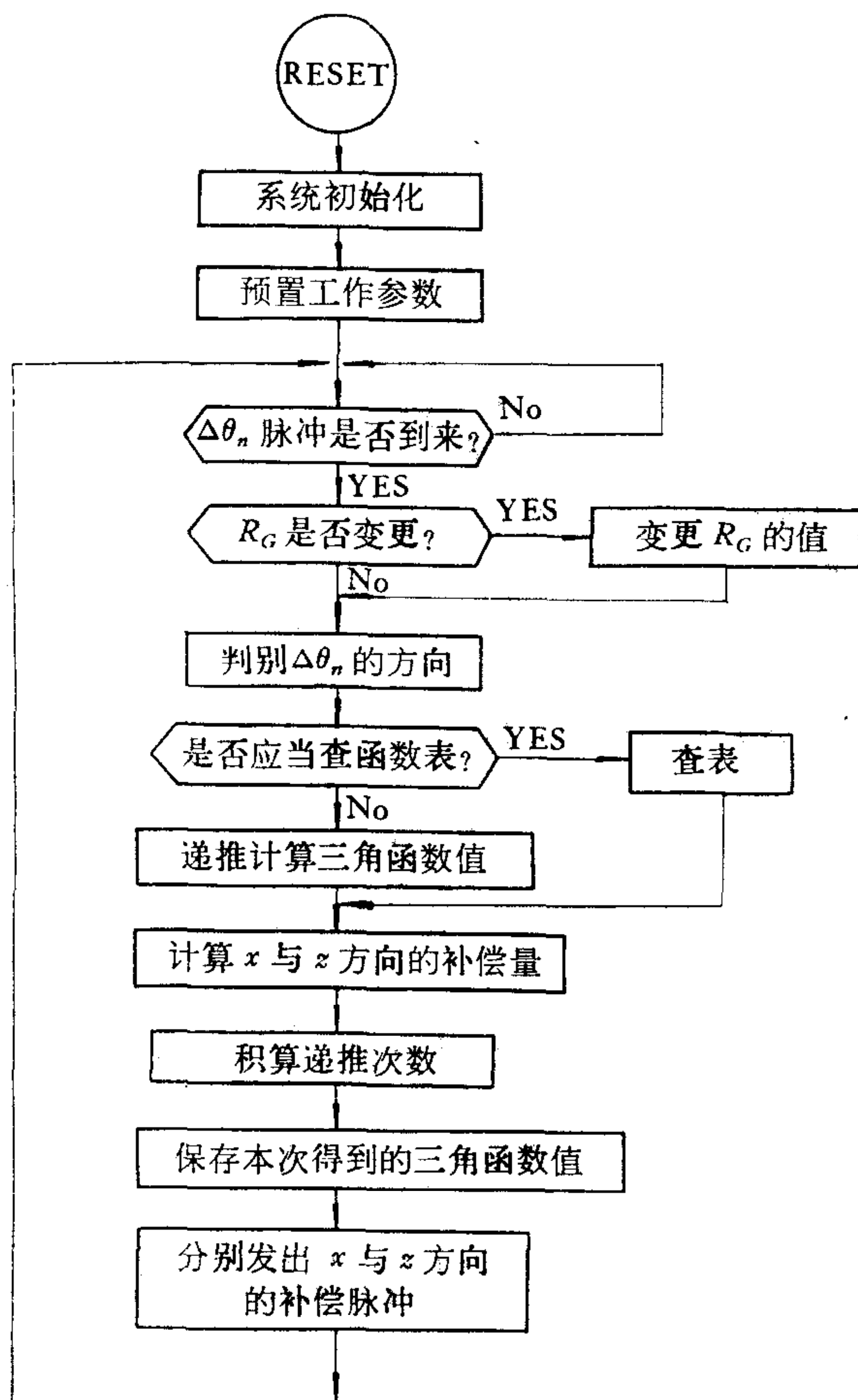


图 2 刀具补偿进给主程序粗框图

止递推计算，而到稀疏函数表中取一个准确的函数值做为后续递推计算的基准值。该算法的缺点是占用更多的存贮空间并使程序结构复杂化，优点是保证了大范围内的递推计算精度。算法选取稀疏函数表中元素间隔为  $0.5^\circ$ 。

(3) 分析计算表明，在极端条件下的计算误差最大可达  $\pm 0.08 \text{ mm}$ ，即某一方向上的补偿进给最多可能误发 8 个脉冲。而模具加工工艺要求周期重复精度很高， $\pm 0.08 \text{ mm}$  的误差是不允许的。考虑到主机工作的特点（在每一个切削周期的起始和终结时刻都要发出相应的脉冲信号），选定每周期的起始和结束脉冲做为中断源，在相应的中断服务程序中检查重复精度，并对积累误差进行修正。这一措施保证了极高的周期重复精度（ $\pm 0.01 \text{ mm}$ ）。

图 2 给出刀具补偿进给主程序的粗框图。

### 三、专用微型单板计算机硬件设计

硬件设计的主要出发点是满足用户提出的功能要求，同时兼顾硬件的通用性、配套性、可扩展性和经济性。对本系统的功能要求是：1) 应允许操作人员预置一些工作参数，包括刀具起始位置、刀具摆动半径、工件半径等；2) 单板机的输入是由主计算机发出的刀具摆动进给脉冲  $\Delta\theta_i$ ，该脉冲的到来时刻是随机的；3) 单板机应输出几路脉冲去驱动相应的步进电机以实现补偿进给，这些输出脉冲的数量与输入脉冲成某种函数关系；4) 在保证控制精度的前提下保证一定的响应速度，每个输入脉冲到来后几毫秒内应完成各路输出脉冲数量的计算，并及时将这些脉冲发出去。为完成上述控制功能，作者采用 Intel 8085 系列电路芯片，设计了 CMC-85A 专用微型单板计算机，其原理结构框图见图 3。

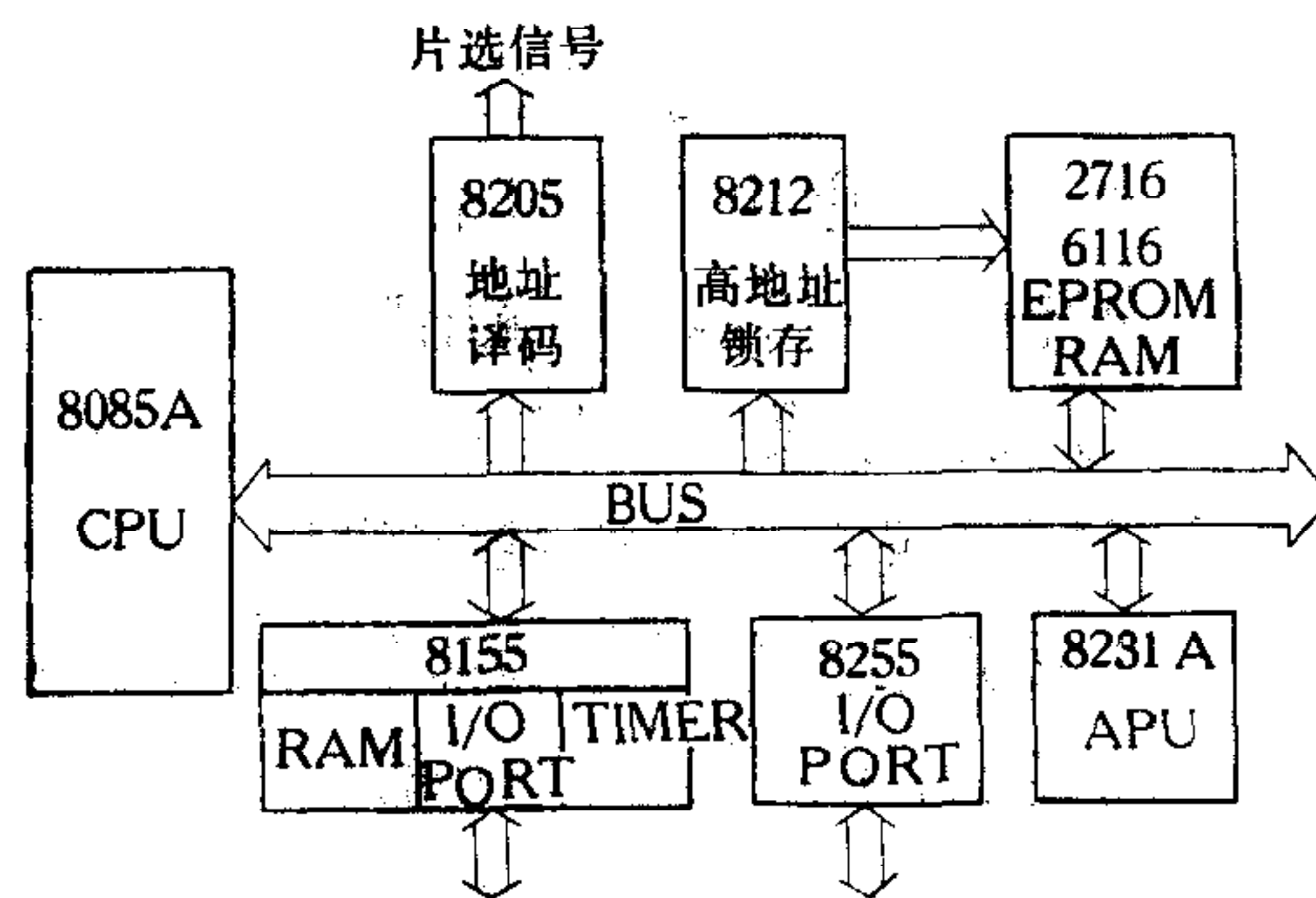


图 3 CMC-85A 单板机硬件结构框图

该机硬件配置如下：CPU 采用中断机构较完善的 8085A，ROM 区为 2K 字节（可再扩充 6K 字节），RAM 区为 256 字节（可再扩充 2K 字节），可编程并行 I/O 通道有 6 组，共 46 位，有一个可编程实时时钟。该机的特点是采用了硬件算术和函数运算部件 8231A (APU) 电路芯片，它与 CPU 并行工作，CPU 使用 I/O 指令向 8231A 发送命令并交换数据，8231A 使用中断方式通知 CPU 运算已完成。它的快速运算功能为实时控制提供了坚实的基础。关于 8231A 的详细介绍见文献 [1]。

## 四、专用微处理机系统的简易开发方法

目前很多单位的微机应用设计者不具备专用的微计算机开发系统 (MDS)。这里介绍一种以通用微型单板机(简称“开发机”)为手段的“简易开发”方法。简易开发要求两个前提,首先,被开发的“目标机”必须使用与开发机相同型号的 CPU;其次,目标机的存储器与 I/O 空间必须较小,以便纳入开发机的寻址空间。

下面介绍以 SDK-85 单板机为开发机,对目标机 CMC-85A 的开发方法。取下目标机的 CPU 芯片,通过接插件将目标机的 CPU 插座各引脚接至开发机 CPU 的相应引脚。并做如下改动:1)把开发机 CPU 地址线的最高位  $A_{15}$  经过一个反相器接至目标机的  $A_{15}$  端。这一改动相当于把目标机的存储器物理空间置于开发机的后 32K 寻址空间上 (SDK-85 单板机没有占用后 32K 空间),同时目标机的 I/O 端口也相应置于开发机外设寻址空间的后半位置上;2)目标机的时钟端  $x_1$  及  $x_2$  不向开发机引出,以免干扰开发机的时钟信号;3)将目标机的中断输入端改接到开发机仍闲置的中断输入端,以免影响开发机本身监控程序所要求的正常中断功能。完成上述准备工作后,即可利用开发机监控程序提供的各种功能对目标机进行硬件和软件调试。

在 CMC-85A 硬件调试中,作者应用上述简易开发方法诊断并纠正了几处硬件设计错误。例如:调试中发现目标机不能正确读出 EPROM 芯片 2716 中所写的数据。经检查分析确认这是由于将 2716 的 PD/PRG 端接地后引起的。作者根据 8085A CPU 地址总线时序的特点,将 PD/PRG 端改接至 CPU 的  $\overline{RD}$  端,故障就排除了。在 CMC-85A 目标软件调试中,作者利用开发机监控程序提供的各种调试功能将各程序模块和子程序分别调试通过后,一次统调成功。

CMC-85A 专用单板机联机运行的结果完全达到了设计指标的要求。在刀具摆角  $\pm 5^\circ$  的小区间内,输出的  $\Delta x$  与  $\Delta z$  补偿脉冲数与理论计算值完全相符;在刀具摆角  $\pm 45^\circ$  的全范围内做极限参数条件下的补偿计算时,其输出脉冲总数与理论值之间的最大误差为 8 个脉冲 (0.08 mm),而周期检查程序段可以将这些偏差完全修正,从而使周期重复精度不超过 0.01mm,实际上该重复精度仅取决于机械间隙与步进电机转角精度。

为了验证 CMC-85A 专用单板机在机床局部功能智能化问题上的通用性,用该机进行了平面绘图仪的直线插补联机实验,用以模拟线切割机床的插补功能,获得了成功。

简易开发手段的局限性是:1)开发机只是一台单板机,基本上不能向目标机出借硬资源,这对于初期设计中不同硬件结构方案的比较与取舍是不利的;2)简易开发所提供软件调试手段较少,不适用于较大规模的应用软件研制。

## 五、结 语

(1) 在工程实践中推广微计算机技术并取得最大经济效益的较好途径,是针对具体的问题设计专用单板机或微计算机系统,而不是采用通用单板机进行扩充或改造。

(2) 在机床数控领域的应用程序设计中,应当尽量探讨递推算法及其它简易算法的

优化模型及实现方式,这对于达到设计指标和提高系统性能往往起关键作用。

(3) 以“局部功能智能化”为基础的分级式网络结构,可以使数控机床的控制系统结构设计简化,可以采用廉价的微处理器芯片实现较强的系统功能,同时因它的模块化而使系统具有较好的可维护性、可靠性和可扩充性。

(4) 对于不具备微计算机开发系统的研制单位,以一般的通用微型单板机为基本手段的简易开发方法是行之有效的。

### 参 考 文 献

- [1] 刘植楨、郭木河、何克忠,计算机控制,清华大学出版社,(1981年)。
- [2] 李三立,微处理器与微计算机,国防工业出版社,(1981年)。
- [3] Lance A. Leventhal, 8080A/8085 Assembly Language Programming, Osborne & Associate, (1978)。

## COMPENSATION FEED CONTROL OF CUTTING TOOL OF NC MILLING MACHINE BY MICROPROCESSOR

ZHANG QINGWEN    REN CHUNONG  
(Qinghua University)

### ABSTRACT

In this paper, an application example of compensation feed of cutting tool of NC milling machine by means of microprocessor is introduced. The design concept for the hardware and software of a single board microcomputer used for cutting tool feeding is related. A simple and easy development method by means of general purpose single board microcomputer is also given.